DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.170236
阎旭东, 王秀领, 徐玉鹏, 王伟伟, 肖宇, 刘振敏, 黄素芳, 岳明强. 旱地春玉米不同覆膜种植模式的增产效应[J]. 中国生态农业学报, 2017, DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.170236
Yan X D, Wang X L, Xu Y P, Wang W W, Xiao Y, Liu Z M, Huang S F, Yue M Q. Yield-increasing effect of film-mulching and planting patterns on spring maize in dryland[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.170236

旱地春玉米不同覆膜种植模式的增产效应*

阎旭东, 王秀领, 徐玉鹏, 王伟伟, 肖　宇, 刘振敏, 黄素芳, 岳明强
(沧州市农林科学院　沧州　061001)

摘　要: 覆膜种植是旱地春玉米种植的重要方式, 具有显著的增产作用。但前人对旱地春玉米在不同覆膜种植方式下的水分利用、根系发育及抗倒伏等增产机理方面研究较少。于2013—2015年在河北省沧州市农林科学院前营试验站开展田间试验, 连续3年研究露地平作(CK)、平作覆膜膜下播种(FC-SUF)、平作覆膜膜侧播种(FC-FSS)、起垄覆膜膜下播种(RC-SUF)、起垄覆膜膜侧播种(RC-FSS)等5种种植模式下春玉米产量及产量构成要素、土壤水分、作物根系和抗倒伏情况。结果表明: RC-FSS、RC-SUF、FC-FSS和FC-SUF比CK 3年分别平均增产24.97%、17.75%、11.69%和8.67%, 其中起垄覆膜侧播技术(RC-FSS)增产效果最优, 其水分利用效率比CK平均提高26.27%。RC-FSS处理垄沟处0~20 cm土壤含水量比CK增幅达30.44%~47.66%, 达极显著差异; RC-FSS处理的抗倒伏性最好, 其倒伏率仅为0.9%, 抗倒伏力最大为29.4 N, 与CK差异达显著水平。在玉米整个生育期内, 0~10 cm土壤温度各覆膜处理比CK平均增加0.3~2.3 ℃, 以RC-SUF种植模式下增温最显著。成熟期RC-FSS模式下根系分布直径、根系干重明显优于RC-SUF、FC-SUF和CK, 差异均达显著水平。研究表明, 春玉米起垄覆膜侧播技术具有集雨保墒、促根壮苗、高抗倒伏、增产稳产的作用, 在春季干旱少雨的滨海平原区有广阔的应用前景。
关键词: 春玉米; 旱地; 覆膜种植; 膜侧播种; 水分利用效率; 根系性状; 增产效应
中图分类号: S513　　**文献标识码:** A

Yield-increase effect of film-mulching and planting pattern on dryland spring maize*

YAN Xudong, WANG Xiuling, XU Yupeng, WANG Weiwei, XIAO Yu, LIU Zhenmin, HUANG Sufang, YUE Mingqiang
(Cangzhou Academy of Agriculture and Forestry, Cangzhou 061001, China)

Abstract: Film mulching is the main mode of cultivation of spring maize in drylands. However, few studies have been conducted on the water use, root development and anti-collapse mechanisms of dry spring maize under different mulching conditions. This was a field research carried out in 2013–2015 at Qianying Experimental Station of Cangzhou Academy of Agriculture and Forestry Sciences. Spring maize (Zhengdan 958) was grown for 3 years under five film-mulching and planting patterns, which were flatbed without film mulching (CK), flatbed with film mulching at sowing (FC-SUF), flatbed with film mulching and film skirting at sowing (FC-FSS), ridge with film mulching at sowing (RC-SUF), and ridge with film mulching and film skirting at sowing (RC-FSS). Yield, yield components, soil moisture, roots and waterlogging resistance of spring maize were measured at different growth stages. The results showed that yields of maize under RC-FSS, RC-SUF, FC-FSS and FC-SUF increased respectively by 24.97%, 17.75%, 11.69% and 17.75% over that of CK, with RC-FSS having the highest yield. Water use efficiency (WUE) under RC-FSS increased by 26.27% compared to CK. In the 0–20 cm soil layer, soil water content was increased by 30.44%–47.66% ($P < 0.01$) under RC-FSS compared with CK. Spring maize under RC-FSS had the maximum waterlogging resistance (29.4 N), which was significantly higher than that of CK ($P < 0.05$). Film mulching increased soil temperature in the 0–10 cm soil layer to 0.3–2.3 °C, and RC-SUF had the maximum soil temperature. RC-FSS had greater root diameter and dry weight of spring maize than RC-SUF, FC-SUF and CK ($P < 0.05$). This study indicated that film mulching on ridges and film skirting at sowing increased or maintained yield of spring maize by rainwater storage and soil moisture conservation, root growth promotion and waterlogging resistance improvement. It implied that it was possible to extensively apply film mulching in the coastal plain areas with drought and little rainfall in spring.

*国家科技支撑计划项目(2013BAD05B0504)和国家重点研发计划项目(2016YFD0300305)资助
阎旭东, 主要从事旱地作物栽培技术的研究。E-mail: yxd7826@126.com
收稿日期: 2017-03-19　接受日期: 2017-06-20
*This research was supported by the National Key Technology Research and Development Program of China (2013BAD05B0504) and the National Key Research and Development Project (2016YFD0300305).
Corresponding author, YAN Xudong, E-mail: yxd7826@126.com
Received Mar. 19, 2017; accepted Jun. 20, 2017

Keywords: Spring maize; Dryland; Film mulching; **film skirting sowing**; Water use efficient; Root trait; Yield-improving effect

环渤海低平原区春玉米(*Zea mays* L.)种植面积占玉米总面积的20%左右，特别是近年来，随着节水压采政策的实施，小麦(*Triticum aestivum* L.)等耗水相对较多的作物种植面积得到压减，冬闲田面积进一步增加，为春玉米种植提供了更大空间。然而该区域春季干旱少雨，在玉米大喇叭口期极易形成“卡脖旱”，造成减产，成为春玉米生产的主要限制因子[1-2]。针对春玉米生产问题，多位专家根据不同地区特点开展了相关研究，孔维萍等[3]研究了黄土高原地区春玉米全膜双垄沟播种植模式，结果表明，其耕层(0~20 cm)土壤含水率较传统种植模式显著提高5.39%，且显著改善了玉米水温条件，促进玉米出苗。孙仕军等[4]、任新茂等[5]研究了东北雨养地区玉米露地与覆膜条件下不同种植密度对春玉米产量和蒸散量的影响，表明覆膜平均产量和水分利用效率较露地种植分别提高52.79%和60.55%。高翔等[6]从表层土壤温湿度、土壤呼吸和净碳交换规律及作物生长发育规律等方面对玉米覆膜种植开展了研究，发现与露地处理比较，覆膜处理全生育期表层土壤含水率提高18.7%，提高地温1.67 ℃。胥凌霄等[7]研究了晋中半干旱地区不同垄沟种植模式对土壤理化性状及水分利用效率的影响，与露地种植相比，大垄小沟种植模式土壤平均含水量增加1.39%，土壤孔隙度增加4%，蓄水保墒效果最好且有机质增幅最大。

尽管一些专家[8-18]对玉米覆膜种植、垄沟种植等技术进行了研究，但针对环渤海低平原区自然特点的春玉米旱作种植技术研究较少。本试验以增温集雨保墒、促苗早发、苗全苗壮为突破口，通过研究起垄、覆膜、膜下、膜侧播种等不同种植模式对雨养春玉米产量形成及水分利用效率的影响，确立该区域春玉米最佳种植模式，为该地区玉米节水高产提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验于 2013—2015 年在位于环渤海低平原区的河北省沧州市农林科学院前营试验站进行。该试验站位于 116º44′3″E, 38º14′23″N，属暖温带半湿润大陆性季风气候，是典型的一年两熟旱作农业区。该区域年总降雨量 400~600 mm, 80%集中在 7—9 月。2013 年、2014 年和 2015 年春玉米生育期降雨量分别为 480.7 mm、254.9 mm 和 404.2 mm。土壤为壤土，年均温 13 ℃，≥10 ℃积温 4 349 ℃。0~20 cm 土层有机质含量 15.4 $g\cdot kg^{-1}$，碱解氮含量 22.3 $mg\cdot kg^{-1}$，速效磷含量 17.9 $mg\cdot kg^{-1}$，速效钾含量 103.0 $mg\cdot kg^{-1}$。

1.2 试验设计

试验采用裂区设计，主区为耕作方式，分别为平作覆膜(flat culture, FC)和垄作覆膜(ridge culture, RC)，起垄方式为垄宽70 cm，垄高15~20 cm，垄距40 cm；副区为播种位置，分别为膜下播种(sowing under film, SUF)和膜侧播种(film skirting sowing, FSS)；另设露地平作为对照(CK)，具体见表1。所有处理均采用宽窄行播种方式，宽行距70 cm，窄行距40 cm，株距24 cm，密度75 000 株$\cdot hm^{-2}$。小区面积为8 m×5 m=40 m^2, 3次重复。

表 1 试验各处理概况

Table 1 Each treatment of the experiment

耕作方式 Tillage pattern	播种位置 Seeding position	处理内容 Processing content
CK		露地平作 Flat planting without film mulching
FC	SUF	平作覆膜膜下播种 Flat film mulching and sowing under film
	FSS	平作覆膜膜侧播种 Flat film mulching and film skirting sowing
RC	SUF	垄作覆膜膜下播种 Film mulching on ridge and sowing under film
	FSS	垄作覆膜膜侧播种 Film mulching on ridge and film skirting sowing

试验春玉米品种为‘郑单 958’。2013 年 5 月 1 日播种, 8 月 25—30 日收获; 2014 年 4 月 25 日播种, 8 月 26—31 日收获; 2015 年 4 月 30 日播种，8 月 29 日—9 月 3 日收获(不同处理玉米成熟时间不同)。试验地播种前底施玉米缓释肥(肥力控 24-16-10，天津市天正天农业科技有限公司)600 $kg\cdot hm^{-2}$，利用沧州市农林科学院研制的起垄覆膜机械播种，对照露地平作机械播种(农哈哈 2BY-4 玉米播种机)，播深 3~3.5 cm，在玉米心叶期每公顷用 3%辛硫磷颗粒剂 3.75 kg，加入 75 kg 细砂拌匀，施入心叶中，其他管理方式同大田。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 产量与产量构成

2013—2015年玉米成熟后，每小区选取中间无破坏行4行，行长3 m测产，用水分仪测定籽粒含水量，按14%含水率折合成产量，重复3次。每小区随机选取连续15株，按常规方法测定穗粒数、百粒重等产量构成因素。

1.3.2 模拟降水试验

2016 年 9 月在田间进行模拟降雨试验。种植模式设 2 个处理，分别为 1：起垄覆膜，垄底宽 70 cm，垄高 15~20 cm，垄距 40 cm，垄上覆宽为 80 cm 的地膜；2：空白露地(对照)，不做任何处理。模拟降雨量设 5 个处理，分别是 0 mm、5 mm、10 mm、15 mm 和 20 mm。共 10 个处理，每个处理 1 个小区，小区宽 5.5 m(5 个带)，长 2 m。在玉米生长至五叶期开始人工模拟降水，每间隔 24 h 取土样，用烘干法测定不同降雨量下起垄覆膜垄沟位置和空白露地 0~20 mm、20~40 cm 土层的土壤含水量，以测定集雨效果。

1.3.3 根系性状

每小区选择有代表性的植株，连续4株96 cm长，去除地上部分后，挖出96 cm×30 cm×60 cm的样方，测定根系分布范围的深度和宽度，计数侧根条数(毛细根除外)，将全部根系烘干称重。

1.3.4 土壤温度

2013—2015 年测定各处理不同时间(从春玉米苗期到成熟期每隔 6 d)0~10 cm 土层的土壤温度，每个处理测定 5 个点，利用 WET-HH2 土壤水分盐分温度速测仪测定。

1.3.5 抗倒伏力

2013—2015 年每年春玉米成熟期每小区选取有代表性的植株，连续 5 株，使用植物倒伏仪(型号 DIK-7401，日本)在距地面 80 cm 处推动玉米植株，记录植株与地面呈 45 度夹角时所需要的力，即为植株的抗倒伏力。

1.3.6 水分利用效率(WUE)

2013—2015 年利用水分平衡法，根据不同时段土壤含水量测定结果，按照以下公式[19]计算农田耗水量(ET)：

$$ET=I+P+U-R-F\pm\Delta W \quad (1)$$

式中：I 为时段内灌水量(mm)；P 为时段内有效降水量(mm)；U 为地下水通过毛管作用上移补给作物水量(mm)；R 为地表径流量(mm)；F 为补给地下水量(mm)；ΔW 为时段内土壤储水变化量，即土壤贮水消耗量。本试验在旱地进行，灌水量为零；试验地地势平坦，视为地表径流为零；地下水埋深 4 m 以下，可视为地下水补给量为零；降水入渗深度不超过 2 m，可视深层渗漏为零，I、R、U、F 值可以忽略不计。农田耗水量简化为 $ET=P\pm\Delta W$。

水分利用效率(WUE)[20]：

$$WUE=GY/ET \quad (2)$$

式中：WUE 为籽粒产量水分利用效率($kg\cdot hm^{-2}\cdot mm^{-1}$)，GY 为籽粒产量($kg\cdot hm^{-2}$)，ET 为农田耗水量(mm)。

在玉米种植前及收获后用烘干法测定 1 m 土体土壤含水量(0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm、60~80 cm、80~100 cm)。

1.4 数据处理与分析

采用 Microsoft Excel 2007 进行数据整理，采用 SPSS 16.0 软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 不同种植方式对春玉米生育时期的影响

由表 2 可知，玉米覆膜比露地平作出苗提前 2~4 d，相同种植模式下膜侧播种比膜下播种出苗天数延长 2 d。与 CK 相比，平作覆膜侧播处理(FC-FSS)对营养生长期天数无影响，垄作覆膜侧播(RC-FSS)可以缩短营养生长期 2 d，平作膜下和垄作膜下播种(FC/RC-SUF)均缩短营养生长期 3 d。在平作(FC)模式下，膜下播种(SUF)处理玉米营养生长期天数比膜侧播种(FSS)处理缩短 3 d；而在垄作(RC)模式下，SUF 处理玉米营养生长期天数比 FSS 处理缩短 1d；玉米覆膜后生殖生长期比露地平作延长 2~9 d，年际间趋势表现一致，总体上表现为 FC-SUF 处理延长的天数最短(2~7 d)，RC-FSS 延长的天数最长(7~9 d)。在 FC 模式下，SUF 处理玉米生殖生长期天数比 FSS 处理延长 0~3 d；而在 RC 模式下，SUF 处理玉米生殖生长期天数比 FSS 处理缩短 2 d。

表 2 不同种植模式对春玉米生育期的影响

Table 2 Influence of different planting patterns on maize growth stages

年份 Year	处理 Treatment		播种期(月-日) Sowing date (month-day)	出苗期 (月-日) Seeding stage (month-day)	吐丝期 (月-日) Silking stage (month-day)	成熟期 (月-日) Maturity stage (month-day)	出苗天数 Emergence days (d)	营养生长期天数 Vegetative growth duration (d)	生殖生长期天数 Reproductive growth duration (d)	全生育期天数 Total growth duration (d)
2013	CK		05-01	05-15	07-22	08-25	14	68	34	102
	FC	SUF	05-01	05-11	07-15	08-25	10	65	41	106
		FSS	05-01	05-13	07-20	08-30	12	68	41	109
	RC	SUF	05-01	05-11	07-15	08-25	10	65	41	106
		FSS	05-01	05-13	07-18	08-30	12	66	43	109
2014	CK		04-25	05-11	07-17	08-28	16	67	42	109
	FC	SUF	04-25	05-07	07-10	08-26	12	64	47	111
		FSS	04-25	05-09	07-15	08-28	14	67	44	111
	RC	SUF	04-25	05-07	07-10	08-26	12	64	47	111
		FSS	04-25	05-09	07-13	08-31	14	65	49	114
2015	CK		04-30	05-14	07-20	08-31	14	67	42	109
	FC	SUF	04-30	05-10	07-13	08-29	10	64	47	111
		FSS	04-30	05-12	07-18	08-31	12	67	44	111
	RC	SUF	04-30	05-10	07-13	08-29	10	64	47	111
		FSS	04-30	05-12	07-16	09-03	12	65	49	114

2.2 不同种植模式对春玉米产量的影响

表 3 表明, FC-SUF、FC-FSS、RC-SUF 和 RC-FSS 分别比对照增产 8.67%、11.69%、17.75%和 24.97%, 达显著水平。FC 和 RC 模式均显著提高了春玉米产量, 分别比对照增产 10.2%和 21.4%; RC 模式比 FC 模式产量平均提高 11.2%, 年际间趋势一致。另外, FSS 比 SUF 产量提高 5.12%。起垄覆膜侧播种处理表现出产量最高, 技术效果最优。

产量构成因素分析表明, 4 种种植模式对春玉米穗数和百粒重无显著影响, 产量差异主要表现在穗粒数的变化。综合 3 年平均数据, RC 模式和 FC 模式的穗粒数分别比 CK 增加 17.5%和 10.3%, 且 RC 种植模式比 FC 种植模式的穗粒数平均增加 6.56%。

表 3 不同种植模式对春玉米产量及产量要素的影响

Table 3 Influence of different planting patterns on yield and yield components of spring maize

处理 Treatment		公顷穗数 Ear number per hectare			穗粒数 Grain number per ear			百粒重 100-grain weight (g)			籽粒产量 Grain yield (kg·hm^{-2})			增产 Yield increase (%)
		2013	2014	2015	2013	2014	2015	2013	2014	2015	2013	2014	2015	
CK		4 142±156.25a	4 042±350.08a	4 708±30.86a	379±6.12e	467±48.54c	370±19.52c	35.9±2.17a	34.48±1.34a	34.53±2.60a	8 351.85±215.02c	8 686.65±1 214.37b	8 646.68±113.12e	0.00
FC	SUF	4 424±235.87a	4 110±116.69a	4 727±47.84a	428±1.50d	510±85.54b	386±24.99bc	36.07±0.44a	35.44±2.28a	31.99±1.34a	9 714.45±647.63b	9 118.05±1 093.77b	9 079.45±95.80d	8.67
	FSS	4 306±52.93a	4 042±350.08a	4 730±60.66a	446±3.84c	511±100.96b	401±7.20bc	37.92±1.46a	35.88±2.00a	34.83±2.28a	9 982.85±95.62b	9 321.15±1078.74b	9 372.81±78.90c	11.69
RC	SUF	4 203±91.68a	4 312±233.39a	4 732±89.41a	463±2.68b	524±39.80ab	420±14.90ab	37.47±0.98a	35.6±2.04a	35.02±2.00a	10 005.00±184.35b	10 148.70±712.15b	10 090.21±95.80b	17.75
	FSS	4 407±200.06a	4 379±116.69a	4 742±178.04a	475±5.07a	537±13.00a	439±23.42a	38.43±2.60a	36.32±1.89a	34.08±2.04a	11 330.40±343.36a	10 458.90±1 804.89a	10 404.24±107.24a	24.97
F values														
耕作方式 Tillage pattern (C)		0.41^{ns}	4.27^{ns}	0.02^{ns}	245.58**	25.78*	10.83*	1.09^{ns}	0.06^{ns}	1.03^{ns}				
播种位置 Seeding position (S)		0.21^{ns}	0.00^{ns}	0.01^{ns}	55.10**	18.33^{ns}	2.23^{ns}	2.36^{ns}	0.24^{ns}	0.71^{ns}				
C·S		2.92^{ns}	0.27^{ns}	0.00^{ns}	1.74^{ns}	1.20^{ns}	0.23^{ns}	0.24^{ns}	0.02^{ns}	2.82^{ns}				

同列不同字母表示不同处理间差异显著(P<0.05), *和**分别表示 0.05 和 0.01 水平差异显著, ns 表示无显著差异。Different letters within the same

column mean significant differences (P < 0.05), * and ** indicate significant differences on 0.05 and 0.01 levels, respectively. ns means no significant difference.

2.3 不同种植模式对春玉米水分利用效率的影响

从表 4 可以看出，RC 处理下春玉米水分利用效率比其他种植方式提高 16.45%~34.30%；其中 3 年 RC-FSS 种植方式比 CK 提高 34.30%、21.47%和 23.04%，且均比其他种植方式水分利用效率高。在降雨较多年份(2013 年 480.7 mm, 2015 年 404.2 mm)水分利用效率均在 20.17~25.53 kg·hm^{-2}·mm^{-1}；而在玉米生育期降雨较少的年份(2014 年 254.9 mm)水分利用效率均在 35.18~40.56 kg·hm^{-2}·mm^{-1}，且 RC 模式比 FC 模式下水分利用效率分别增加 7.24%、11.83%和 11.84%。RC 模式与 CK 处理比较均达到显著差异，说明在雨养旱作区起垄覆膜种植方式能较大幅度提高水分利用率。

表 4 不同种植模式对春玉米耕层土壤水分利用效率的影响

Table 4 Water use efficiency of spring maize in plough layer under different planting patterns kg·hm^{-2}·mm^{-1}

处理 Treatment		土壤含水量 Soil moisture content (%)			农田耗水量 Field water consumption (mm)			水分利用效率 Water use efficiency (kg·hm^{-2}·mm^{-1})		
		2013	2014	2015	2013	2014	2015	2013	2014	2015
CK		1.53±0.34b	5.27±0.15a	12.54±0.13a	482.23±0.34b	260.17±0.15a	416.74±0.13a	17.32±0.21c	33.39±4.65c	20.75±0.09c
FC	SUF	0.93±0.16b	4.26±0.81a	7.63±0.58b	481.63±0.16b	259.16±0.81a	411.83±0.58b	20.17±0.78b	35.18±4.21b	22.05±0.09b
	FSS	1.22±0.37b	4.61±0.44a	6.77±0.17b	481.92±0.37b	259.51±0.44a	410.97±.17b	20.74±0.07ab	35.92±2.77b	22.81±0.18ab
RC	SUF	4.83±1.03ab	5.69±0.13a	5.30±0.50b	485.53±1.03ab	260.59±0.13a	409.50±0.50b	20.61±0.31ab	38.95±1.05ab	24.64±0.24ab
	FSS	6.52±0.78a	2.96±0.18a	4.62±0.42b	487.22±0.78a	257.86±0.18a	408.82±0.42b	23.26±0.71a	40.56±6.99a	25.53±0.11a

2013—2015 年玉米全生育期的降雨量分别为 480.7 mm、254.9 mm 和 404.2 mm。同列不同字母表示不同处理间差异显著(P<0.05)。The total rainfall during the whole growth period of maize in 2013–2015 was 480.7 mm, 254.9 mm and 404.2 mm. Different letters within the same column mean significant differences (P < 0.05).

2.4 起垄膜侧种植模式的集雨效果

由表 5 知，与 FC 处理相比，RC-FSS 具有显著的集雨效果。当模拟降雨分别为 5 mm、10 mm、15 mm 和 20 mm 时，RC-FSS 模式垄沟处 0~20 cm 土层的土壤含水量分别比 CK 增加 4.04%、5.69%、6.36%和 7.22%，增幅分别为 30.44%、41.81%、43.68%和 47.66%，其差异均达极显著水平；20~40 cm 土层的土壤含水量分别比对照增加 2.31%、3.40%、4.63%和 5.85%，增幅分别为 16.39%、23.50%、31.24%和 38.01%，其差异达极显著水平。RC-FSS 模式下 0~20 cm 耕层的土壤含水量增加更明显。

表 5 模拟降雨量下不同起垄膜侧种植模式不同土层的土壤含水量

Table 5 Soil moisture contents in different soil layers of planting pattern of Film mulching on ridge and film skirting sowing under simulated rainfall conditions

模拟降雨量 Simulated rainfall (mm)	0~20 cm			20~40 cm		
	RC-FSS	CK	比 CK 增加 Increase over CK (%)	RC-FSS	CK	比 CK 增加 Increase over CK (%)
0	11.01±0.10d	11.01±0.10c	0.00	13.96a±0.24e	13.24±0.33b	0.00
5	17.31±0.52c	13.27±0.54b	30.44	16.40b±0.46d	13.87±0.48b	16.39
10	19.30±0.42b	13.61±0.36b	41.81	17.87c±0.06c	14.38±0.33ab	23.50
15	20.92±0.44a	14.56±0.11ab	43.68	19.45d±0.36b	15.33±0.54ab	31.24
20	22.37±0.12a	15.15±0.31a	47.66	21.24e±0.27a	15.97±0.42a	38.01

不同字母表示不同模拟降雨量间差异显著(P<0.05)。Different letters within the same column mean significant differences (P < 0.05) among different simulated rainfalls.

2.5 不同种植模式的土壤增温效果

表 6 表明，各覆膜处理比 CK 增温 0.3~2.3 ℃。在 FC 模式和 RC 模式下，SUF 处理比 FSS 处理耕层土壤温度分别提高 1.13 ℃(P<0.05)和 1.28 ℃(P<0.05)，以 RC-SUF 种植模式下增温最显著。随着生育时期的推进，覆膜的增温效果逐渐下降，以膜下播种的降幅最大。

表 6 不同种植模式在春玉米不同生育期的土壤增温效果

Table 6 Influence of different planting patterns on soil temperature at different growth stages of spring maize ℃

年份 Year	处理 Treatment	苗期 Seeding stage	拔节期 Jointing stage	大喇叭口期 Trumpet stage	吐丝期 Silking stage

			平均 Average	比 CK 增温 Increasing temperature than CK	平均 Average	比 CK 增温 Increasing temperature than CK	平均 Average	比 CK 增温 Increasing temperature than CK	平均 Average	比 CK 增温 Increasing temperature than CK
2013		CK	27.93±0.23a	0.00	35.43±0.23a	0.00	28.17±1.60a	0.00	27.50±0.10a	0.00
	FC	SUF	28.20±1.50a	0.27	38.47±0.51a	3.04	28.82±1.31a	0.65	27.63±0.06a	0.13
		FSS	28.30±0.35a	0.37	36.77±0.35a	1.34	28.82±1.31a	0.65	27.63±0.32a	0.13
	RC	SUF	29.40±0.62a	1.47	38.97±0.85a	3.54	30.24±1.73a	2.07	29.10±0.72a	1.60
		FSS	28.67±1.01a	0.74	36.77±1.02a	1.34	29.49±1.55a	1.32	28.43±1.12a	0.93
2014		CK	19.67±1.12a	0.00	29.2±0.46a	0.00	29.80±0.89a	0.00	27.63±0.15a	0.00
	FC	SUF	21.29±0.54a	1.62	30.80±0.40a	1.60	30.27±0.57a	0.47	27.83±0.06a	0.20
		FSS	19.64±0.25a	0.03	29.37±0.31a	0.17	30.27±0.55a	0.47	27.77±0.06a	0.14
	RC	SUF	22.23±0.46a	2.56	31.43±0.70a	2.23	32.23±0.83a	2.43	28.57±0.07a	0.94
		FSS	20.68±0.13a	1.01	30.13±0.32a	0.93	31.27±0.51a	1.47	28.07±0.29a	0.44
2015		CK	27.53±1.33a	0.00	28.53±0.06a	0.00	27.47±0.78a	0.00	27.80±0.78a	0.00
	FC	SUF	30.33±1.11a	2.80	29.87±0.40a	1.34	28.30±0.53a	0.83	28.40±0.53a	0.60
		FSS	27.83±1.90a	0.30	28.77±0.06a	0.24	27.90±0.53a	0.43	28.00±0.53a	0.20
	RC	SUF	30.77±1.84a	3.24	31.17±1.12a	2.64	29.93±1.19a	2.46	29.50±1.19a	1.70
		FSS	29.93±0.21a	2.40	29.47±0.32a	0.94	28.87±0.50a	1.40	28.70±0.50a	0.90

同列同一年份不同字母表示不同处理间差异显著(P<0.05)。Different letters within the same column in the same year mean significant differences (P < 0.05) among different planting patterns.

2.6 不同种植方式对玉米根系性状的影响

玉米成熟期分别测定根系分布直径、根系长、根系干重等。结果表明，与露地平作相比, RC-FSS 种植模式下根系分布直径、根系干重、侧根条数均达到显著水平，但与根系长度差异不明显。因此，起垄覆膜侧播种植模式可以促进根系发育，特别是增加了根系直径和根系干物重，这是其增产的重要原因(表 7)。

表 7　不同种植模式下春玉米成熟期的根系性状

Table 7　Root characteristics of spring maize under different planting patterns at mature stage

处理 Treatment		分布范围 Distribution rang (cm) 直径 Diameter	深度 Depth	侧根数 Lateral root number	干重 Dry weight (g)
CK		10.3±0.43 c	40.6±0.36a	35.4±0.51b	11.92±0.41c
FC	SUF	12.6±0.25a	40.5±0.10a	36.8±0.35b	17.2±2.51bc
	FSS	11.8±0.55b	40.6±0.47a	35.9±0.40b	21.1±1.46b
RC-	SUF	12.5±0.15ab	40.6±0.51a	36.6±0.51b	16.99±3.26bc
	FSS	12.9±0.25a	41.0±2.24a	40.2±2.13a	32.84±7.36a

同列不同字母表示不同处理间差异显著(P<0.05)。Different letters within the same column mean significant differences (P < 0.05).

2.7 不同种植模式对玉米抗倒性的影响

表 8 表明，不同覆膜种植模式比较，膜侧播种表现出明显的抗倒伏优势，膜下播种抗倒性较差，对照处理抗倒伏性最差。RC-FSS 处理玉米抗倒伏性最好，其倒伏率为 0.9%，抗倒伏力最大，为 29.4 N，该处理与 RC-SUF、FC-SUF 及 CK 间差异均达显著水平，与 FC-FSS 处理差异不显著。

表 8　不同种植模式对春玉米倒伏率和抗倒伏力

Table 8　Lodging rate and lodging force of maize under different planting patterns

	处理 Treatment	倒伏率 Lodging rate (%)	抗倒伏力 Lodging resistant force (N)
CK		24.7±15.49a	19.3±0.40c
FC	SUF	14.3±0.70abc	22.5±0.11b
	FSS	2.7±0.46bc	24.3±1.33a
RC	SUF	15.6±3.91ab	22.2±0.63b
	FSS	0.9±0.35c	29.4±0.06a

3 讨论

环渤海低平原雨养旱作区，春季地温低，雨水少，传统的春玉米种植方式受播种时气温、地温、墒情等因素的影响，常出现苗不齐、苗不壮、发苗慢等现象。受 5、6 月干旱少雨影响，在春玉米需水需肥关键时期大喇叭口期形成“卡脖旱”，造成减产，严重制约了该地区的春玉米生产[1-2]。

张晓辉[21]研究表明，地膜覆盖技术不仅能够提高土壤温度，减少土壤水分蒸发，改善土壤的水热条件，提高土壤生物活性，抑制返盐和杂草生长等，还能促进作物生长发育和丰产早熟。王耀林等[22-23]研究证明，利用地膜覆盖种植玉米，增产幅度达 30%~60%，可获得较高的经济效益。因此，地膜覆盖技术已经成为旱作农业生产中协调水热资源重要栽培措施之一[24]。本研究通过对不同覆膜播种方式对春玉米生长发育、产量及土壤环境的影响，结果表明，覆膜播种能提高土壤温度、水分，改善土壤的水热条件，对玉米株高、叶面积、干物质积累均有促进作用，通过穗粒数、百粒重的增加提高籽粒产量，与前人研究结果基本一致。

本研究明确了环渤海低平原雨养旱作区不同覆膜播种模式的技术效果，确定了该区域采用起垄覆膜侧播的技术模式产量最高，技术效果最优，有效解决了玉米需水需肥关键时期大喇叭口期形成“卡脖旱”问题。主要是起垄覆膜膜侧种植模式的集雨效果，使环渤海低平原雨养旱作区春季少量多次的无效降雨变为春玉米生长发育所需要的有效水分，有效改善作物根区的土壤水分状况，显著提高水分利用率。采取起垄覆膜膜侧播技术，解决了传统膜下播种技术土壤过松，玉米生长后期遇雨易倒伏的难题，提高了技术的稳产性。

4 结论

1)起垄覆膜种植模式能显著提高春玉米产量。起垄覆膜种植模式比平作覆膜种植模式增产 11.37%，其中，起垄覆膜侧播技术比对照露地平作方式平均增产 24.97%，比起垄膜下种植平均增产 13.3%。

2)起垄覆膜膜侧种植模式具有明显的集雨效果。起垄覆膜垄沟处 0~20 cm 土层的土壤含水量分别比对照增加 30.44%、41.81%、43.68%和 47.66%，其差异达极显著水平，在 RC-FSS 模式下 0~20 cm 耕层的土壤含水量增加更明显。

3)覆膜种植能显著提高水分利用效率。与其他种植方式相比，RC 模式下水分利用效率可提高 16.45%~34.30%，其中 RC-FSS 比 CK 平均提高 26.27%，且均比其他种植方式高，与产量的增产效果呈正相关。

4)起垄覆膜种植可有效促进根系发育，显著降低春玉米倒伏率。与 CK 相比，RC-FSS 种植模式下，根系分布宽度、侧根条数和根系干重均达显著水平，同时增加了春玉米的抗倒性。起垄覆膜侧播处理的倒伏率仅为 0.9%，抗倒伏力最大，为 29.4 N。

5)根据本研究形成的起垄覆膜侧播种植模式，具有显著的集雨保墒、促根壮苗、抗倒伏、稳产增产的作用，可有效缓解环渤海低平原区春玉米种植中春季地温低、苗期降水少所带来的生产难题，在该区域春玉米生产中具有广阔的应用前景。

参考文献 References

[1] 刘明，陶洪斌，王璞，等. 播期对春玉米生长发育与产量形成的影响[J]. 中国生态农业学报, 2009, 17(1): 18−23
Liu M, Tao H B, Wang P, et al. Effect of sowing date on growth and yield of spring-maize[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2009, 17(1): 18−23

[2] 唐小明，李尚中，樊廷录，等. 不同覆膜方式对旱地玉米生长发育和产量的影响[J]. 玉米科学, 2011, 19(4): 103–107
Tang X M, Li S Z, Fan T L, et al. Effects of different plastic film mulching modes on growth and yield of dry land maize[J]. Journal of Maize Sciences, 2011, 19(4): 103–107

[3] 孔维萍，成自勇，张芮，等. 不同覆盖及种植方式下旱地玉米前期水热及出苗效应[J]. 灌溉排水学报, 2014, 33(3): 119–121
Kong W P, Cheng Z Y, Zhang R, et al. Effects of different covers modes and cropping patterns on water and heat in early stage and seeding rates of maize in dry land[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2014, 33(3): 119–121

[4] 孙仕军，樊玉苗，许志浩，等. 东北雨养区地膜覆盖条件下种植密度对玉米田间土壤水分和产量的影响[J]. 生物学杂志, 2014, 33(10): 2650–2655
Sun S J, Fan Y M, Xu Z H, et al. Effects of planting density on soil moisture and corn yield under plastic film mulching in a rain-fed region of northeast China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2014, 33(10): 2650–2655

[5] 任新茂，孙东宝，王庆锁. 覆膜和种植密度对旱作春玉米产量和蒸散量的影响[J]. 农业机械学报, 2017, 48(1): 206–211
Ren X M, Sun D B, Wang Q S. Effects of plastic film mulching and plant density on yield and evapotranspiration of rainfed

spring maize[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(1): 206–211
[6] 高翔, 龚道枝, 顾峰雪, 等. 覆膜抑制土壤呼吸提高旱作春玉米产量[J]. 农业工程学报, 2014, 30(6): 62–70
Gao X, Gong D Z, Gu F X, et al. Inhibiting soil respiration and improving yield of spring maize in fields with plastic film mulching[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(6): 62–70
[7] 胥凌霄, 段喜明, 刘瑞龙. 不同沟垄种植模式对土壤理化性状及水分利用效率的影响[J]. 山西农业大学学报: 自然科学版, 2017, 37(2): 83–88
Xu L X, Duan X M, Liu R L. The effect of different ridge and furrow planting pattern on the physical and chemical characteristics of soil and efficient utilization of water[J]. Journal of Shanxi Agricultural University: Natural Science Edition, 2017, 37(2): 83–88
[8] 张俊鹏, 孙景生, 刘祖贵, 等. 不同水分条件和覆盖处理对夏玉米籽粒灌浆特性和产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(3): 501–506
Zhang J P, Sun J S, Liu Z G, et al. Effect of moisture and mulching on filling characteristics and yield of summer maize[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2010, 18(3): 501–506
[9] Li J, Xie R Z, Wang K R, et al. Variations in maize dry matter, harvest index, and grain yield with plant density[J]. Agronomy Journal, 2015, 107(3): 829–834
[10] Antonietta M, Fanello D D, Acciaresi H A, et al. Senescence and yield responses to plant density in stay green and earlier-senescing maize hybrids from Argentina[J]. Field Crops Research, 2014, 155: 111–119
[11] Zhou L M, Li F M, Jin S L, et al. How two ridges and the furrow mulched with plastic film affect soil water, soil temperature and yield of maize on the semiarid Loess Plateau of China[J]. Field Crops Research, 2009, 113(1): 41–47
[12] Bruns H A, Abbas H K. Ultra-high plant populations and nitrogen fertility effects on corn in the Mississippi Valley[J]. Agronomy Journal, 2005, 97(4): 1136–1140
[13] Li R, Hou X Q, Jia Z K, et al. Effects on soil temperature, moisture, and maize yield of cultivation with ridge and furrow mulching in the rained area of the Loess Plateau, China[J]. Agricultural Water Management, 2013, 116: 101–109
[14] Zhou L M, Jin S L, Liu C A, et al. Ridge-furrow and plastic-mulching tillage enhances maize-soil interactions: Opportunities and challenges in a semiarid agroecosystem[J]. Field Crops Research, 2012, 126: 181–188
[15] 徐澜, 安伟, 郝建平. 渗水地膜覆盖对旱作玉米生理特性、产量构成因素及产量的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2010, 24(8): 180–185
Xu L, An W, Hao J P. The effect of water-osmosis plastic membrane on physiology、yield component and yield for drought maize[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2010, 24(8): 180–185
[16] 李洪勋, 吴伯志. 地膜覆盖对玉米生理指标的影响研究综述[J]. 玉米科学, 2004, 12(S1): 66–69
Li H X, Wu B Z. Summary of polythene mulch on physiological index of maize[J]. Journal of Maize Sciences, 2004, 12(S1): 66–69
[17] 刘晓伟, 何宝林, 郭天文. 全膜双垄沟不同覆膜时期对玉米土壤水分和产量的影响[J]. 核农学报, 2012, 26(3): 602–608
Liu X W, He B L, Guo T W. Effects of full mulching on double ridges with different mulching methods on soil water content and maize yield in dryland[J]. Acta Agriculturae Nucleatae Sinica, 2012, 26(3): 602–608
[18] 高玉红, 牛俊义, 闫志利, 等. 不同覆膜栽培方式对玉米干物质积累及产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(4): 440–446
Gao Y H, Niu J Y, Yan Z L, et al. Effects of different plastic-film mulching techniques on maize (*Zea mays* L.) dry matter accumulation and yield[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, 20(4): 440−446
[19] 江晓东, 李增嘉, 侯连涛, 等. 少免耕对灌溉农田冬小麦/夏玉米作物水、肥利用的影响[J]. 农业工程学报, 2005, 21(7): 20–24
Jiang X D, Li Z J, Hou L T, et al. Impacts of minimum tillage and no-tillage systems on soil NO_3^--N content and water use efficiency of winter wheat /summer corn cultivation[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(7): 20–24
[20] 侯连涛, 江晓东, 韩宾, 等. 不同覆盖处理对冬小麦气体交换参数及水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2006, 22(9): 58–63
Hou L T, Jiang X D, Han B, et al. Effects of different mulching treatments on the gas exchange parameters and water use efficiency of winter wheat[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(9): 58–63
[21] 张晓辉. 地膜集水技术在北方旱作玉米栽培中的应用[J]. 安徽农业科学, 2006, 34(23): 6151–6153
Zhang X H. Application of the technique of water-collecting with plastic film in corn cultivation in dry-land[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2006, 34(23): 6151–6153
[22] 王耀林. 花生 玉米 棉花 西瓜地膜覆盖高产早熟栽培技术[M]. 北京: 金盾出版社, 1988: 66–69
Wang Y L. Cultivation Techniques of High Yield and Early Maturity for Peanut, Maize, Cotton and Watermelon Plastic Film

Mulching[M]. Beijing: Golden Shield Press, 1988: 66–69
[23] 马金虎, 田恩平, 王永成. 秋季覆膜技术在玉米上应用效果试验初报[J]. 宁夏农林科技, 2007, (5): 31–39
Ma J H, Tian E P, Wang Y C. Preliminary report on application effect of mulch film technology in maize in autumn[J]. Ningxia Agriculture and Forestry Science and Technology, 2007, (5): 31–39
[24] 邢胜利, 魏延安, 李思训. 陕西省农作物地膜栽培发展现状与展望[J]. 干旱地区农业研究, 2002, 20(1): 10–13
Xing S L, Wei Y A, Li S X. Present status and prospect of film-mulching cultivation of crops in Shaanxi Province[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2002, 20(1): 10–13